

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh základních parametrů kondenzátoru

Proposal of Steam Condenser Basic Parameters

Student:

Veronika Hegerová

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Stáňa, PhD.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Veronika Hegerová**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R004 Provoz a řízení v energetice
Téma: **Návrh základních parametrů kondenzátoru**
Proposal of Steam Condenser Basic Parameters

Zásady pro vypracování:

Navrhněte základní parametry kondenzátoru za parní turbínou TG4 v Elektrárně Opatovice

1. Určete celkové množství tepla odváděného v kondenzátoru
2. Navrhněte uspořádání trubek a celkovou velikost teplosměnné plochy
3. Posuďte vliv netěsnosti kondenzátoru

Seznam doporučené odborné literatury:

Kalčík, J., Sýkora, K.: Technická termomechanika, Vydavatelství Academia Praha 1973
Šorin, S.N.: Sdílení tepla, SNTL - Nakladatelství technické literatury 1968
Sazima, M., Kmoníček, V., Schneller, J. a kol.: Teplo, SNTL - Nakladatelství technické literatury 1989, ISBN 80-03-00043-2

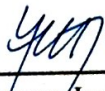
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Stáňa, PhD.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě23.5.2011.....

Veronika Hegerová

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23.5.2011

Veronika Hegerová

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Veronika Hegerová

Adresa trvalého pobytu autora práce: Smetanova 238, Opatovice nad Labem, 533 45

Anotace bakalářské práce

HEGEROVÁ, V. Návrh základních parametrů kondenzátoru : Bakalářská práce. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 39 s. Vedoucí práce: Stáňa, M.

Bakalářská práce se zabývá návrhem základních parametrů kondenzátoru za parní turbínou TG4 instalovanou v Elektrárně Opatovice. V úvodu jsou nastíněna hlediska, která je nutno respektovat od prvopočátku samotného navrhování (investiční náklady, faktor znečištění). Na základě výpočtu tepelné energie obsažené v páře je navrženo zařízení o potřebné velikosti teplosměnné plochy. Řešení zahrnuje i celkové dispozice kondenzátoru s ohledem na provozní podmínky výše uvedené elektrárny. Součástí bakalářské práce je i problematika netěsností kondenzátoru, při nichž dochází k poklesu vakua a následně i ke snížení účinnosti turbíny.

Annotation of Bachelor Thesis

HEGEROVÁ, V. Proposal of Steam Condenser Basic Parameters: Bachelor Thesis. Ostrava : VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering, 2011, 39 p. Thesis head: Stáňa, M.

Bachelor Thesis is dealing with proposal of condenser basic parameters connected to steam turbine installed in Power station Opatovice. In the introduction are outlined standpoints which we have to respect since the beginning (investment costs, pollution factor). Equipment with sufficient size of heat transfer surface was proposed on the basis of calculated energy included in steam. The solution also includes the overall layout of the condenser with respect to the operation conditions of the plant. Part of the Bachelor Thesis is the problem of leakages condenser which involve a decrease in vacuum and subsequently to reduce the efficiency of the turbine.

Obsah

Seznam použitých symbolů a značek	8
Seznam použitých symbolů	8
Seznam použitých značek	9
1. Úvod	10
1.1. Konstrukce kondenzátoru.....	11
1.2. Funkce kondenzátoru v Clausius-Rankinově oběhu.....	13
2. Nároky uvažované při navrhování kondenzátoru	14
2.1. Požadavky na zařízení.....	14
2.2. Požadavky na pracovní (teplonosné) látky.....	14
2.2.1. Výhody a nevýhody syté páry jako teplonosné látky vůči vodě	15
3. Teoretický výpočet.....	15
3.1. Celkové množství tepla výstupní páry z turbíny	15
3.2. Určení rychlosti chladicí vody.....	16
3.3. Součinitel přestupu tepla α_1 na straně vody	16
3.4. Součinitel přestupu α_2 na straně páry.....	17
3.5. Střední (logaritmický) teplotní rozdíl	18
3.6. Součinitele prostupu tepla - čisté výhřevné plochy	19
3.7. Součinitele prostupu tepla - zanesené výhřevné plochy	19
3.8. Velikost teplosměnné plochy	20
3.9. Celkový počet trubek	20
4. Uspořádání trubek v trubkovnici.....	21
4.1. Podmínky uspořádání.....	21
4.2. Varianty uložení.....	21

5.	Výpočet celkového množství tepla odvedeného v kondenzátoru	22
5.1.	Parametry turbíny	23
5.2.	Výpočet tepelného výkonu kondenzátoru	23
6.	Návrh uspořádání trubek a velikosti teplosměnné plochy	24
6.1.	Hodnoty potřebné pro výpočet velikosti teplosměnné plochy	24
6.1.1.	Výpočet součinitele přestupu tepla α_1 na straně vody.....	24
6.1.2.	Výpočet součinitele přestupu α_2 na straně páry	25
6.1.3.	Výpočet středního (logaritmického) teplotního rozdílu	29
6.1.4.	Výpočet součinitele prostupu tepla-čisté výhřevné plochy	30
6.2.	Výpočet velikosti teplosměnné plochy	31
6.3.	Celkový počet trubek	32
6.4.	Parametry navrženého kondenzátoru	32
7.	Posud'te vliv netěsnosti kondenzátoru	33
7.1.	Netěsnosti trubek	33
7.1.1.	Smísení demineralizované a chladicí vody	33
7.1.2.	Zhoršení vakua.....	33
7.1.3.	Zlepšení vakua v kondenzátoru	33
8.	Závěr	38
9.	Použitá literatura.....	39

Seznam použitých symbolů a značek

Seznam použitých symbolů

C	[-]	- konstanta závisající na uspořádání trubek
c_m	[-]	- korekční faktor pro daný materiál a tloušťku trubek
c_t	[-]	- korekční součinitel pro vstupní teplotu chladicí vody
c_p	[$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	- měrná tepelná kapacita
d_1	[m]	- vnitřní průměr trubky
d_2	[m]	- vnější průměr trubky
Ga	[-]	- Galileiho číslo
i_p	[$J \cdot kg^{-1}$]	- entalpie páry
i_k	[$J \cdot kg^{-1}$]	- entalpie kondenzátu
k	[$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	- součinitel prostupu tepla
K	[-]	- kondenzační kritérium
k_o	[$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	- základní součinitel prostupu tepla
k_{ξ}	[$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	- součinitel prostupu tepla - čistý stav trubek
k_{sk}	[$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	- součinitel prostupu tepla - skutečný
l	[m]	- délka trubky
\dot{m}_p	[$kg \cdot s^{-1}$]	- hmotnostní průtok páry
\dot{m}_k	[$kg \cdot s^{-1}$]	- hmotnostní průtok kondenzátu
n	[-]	- experimentálně zjištěná konstanta
n_{tr}	[-]	- počet trubek v kondenzátoru
Nu_{trub}	[-]	- Nusseltovo číslo – pro turbulentní proudění
\dot{q}_1	[$W \cdot m^{-1}$]	- teplo sdělené 1 m válcové trubky
Pr	[-]	- Prandtlovo číslo
\dot{Q}	[W]	- příkon(výkon) kondenzátoru
r	[$J \cdot kg^{-1}$] ^{1/4}	- výparné teplo
Re	[-]	- Reynoldsovo číslo
S	[m^2]	- velikost teplosměnné plochy
t_p	[°C]	- teplota páry
t_k	[°C]	- teplota kondenzátu
t_v	[°C]	- teplota chladicí vody

t_w	[°C]	- teplota povrchu trubky
$\Delta t_{stř}$	[°C]	- střední (logaritmický) teplotní spád
w	[m · s ⁻¹]	- rychlost chladicí vody v trubkách kondenzátoru
α_1	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	- součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vody
α_2	[W · m ⁻² · K ⁻¹]	- součinitel přestupu tepla konvekcí na straně páry
ε	[-]	- korekční součinitel závisející na řadě trubek
φ	[-]	- součinitel zanášení
λ	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	- tepelná vodivost
μ	[kg · s · m ⁻²]	- dynamická viskozita
ρ	[kg · m ⁻³]	- hustota chladicí vody
ν	[m ² · s ⁻¹]	- kinematická viskozita
ζ	[-]	- součinitel místního odporu

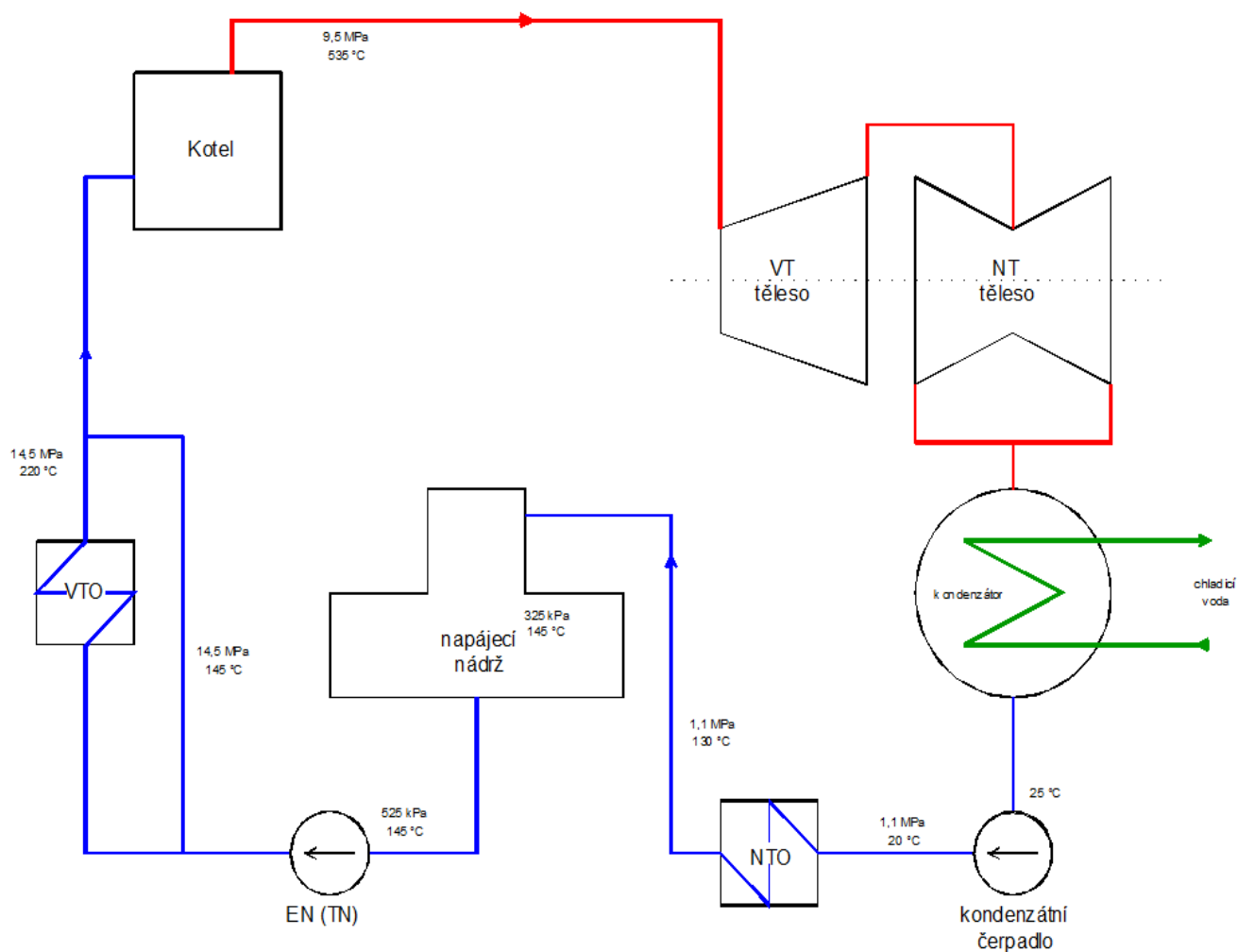
Seznam použitých značek

EN	elektronapajčka
TN	turbonapajčka
EOP	Elektrárna Opatovice
K	kondenzátor
N	napáječka
NTO	nízkotlaký regenerační ohřívák
OP	oběh páry
P	přehřívák
PS	parní stroj
PT	parní turbína
RZV	rychlozávěrný ventil
TG	turbogenerátor
VTO	vysokotlaký regenerační ohřívák

1. Úvod

Rozměrový návrh tepelného výměníku vychází z potřebné velikosti teplosměnné plochy. Optimální stanovení této plochy hraje významnou roli v otázce investičních nákladů. Z hlediska dlouhodobého provozu je její velikost zásadně ovlivněna faktorem zanesení, který se odhaduje pro jednotlivá média na základě experimentu.

Navrhovaný kondenzátor je konstruován dle parametrů turbíny v Opatovické elektrárně. Emisní pára, která vystupuje z NT dílu turbíny vstupuje do kondenzátoru. Zde dochází v důsledku odebrání kondenzačního tepla emisní páře chladicím médiem ke kondenzaci. Jako chladicí médium má elektrárna Opatovice k dispozici surovou labskou vodu. Na následujícím obrázku (obr.1.1) je znázorněn oběh v EOP.



Obrázek 1.1 schéma oběhu v EOP [1]

1.1. Konstrukce kondenzátoru

Následující popis blíže specifikuje již instalovaný kondenzátor v EOP.[1] Kondenzátor (obr.1.2) je válcová, ležatá nádoba rozdělená na vodní a parní prostor. Vodní prostor je tvořen vnitřky kondenzátorových trubek a komorami na čelech kondenzátoru. Vodní komory na předním čele jsou dělené vertikálně a horizontálně, na zadním čele pouze vertikálně. Dělením vodních komor je dán počet tahů. Na čele kondenzátoru je průlez do vodních komor, umožňující jejich čištění za provozu turbíny, bez nutnosti demontáže čel. Chladicí voda vstupuje spodem do spodních polovin předních vodních komor. Dále protéká spodní polovinou trubek do zadních vodních komor, kde obrací směr toku a protéká horní polovinou trubek do horních polovin předních vodních komor. Poté vystupuje z kondenzátoru a potrubím je zavedena do jímky oteplené vody. V nejvyšším místě vodního prostoru je napojeno odsávání, které zamezuje vytváření vzduchových a parních kapes, které by bránily protékání chladicí vody. Vodní komory jsou opatřeny ručními šoupátky pro vypouštění chladicí vody v případě čištění kondenzátorů za provozu turbíny. Výstupní potrubí z kondenzátorů je opatřeno hrdly s demontovatelnými záslepkami pro rychlejší zavzdušnění vodních komor.

Parní prostor kondenzátoru je od vodního prostoru oddělen trubkovnicemi. V trubkovnicích jsou zaválcovány kondenzátorové trubky. Tyto trubky vyplňují parní prostor a jsou rozloženy tak, aby byl umožněn co nejlepší přístup páry k jednotlivým trubkám a aby se při stékání kondenzátu s horních trubek nevytvářely kondenzační blány.

Prohnutí (vlivem vlastní hmotnosti) jednotlivých trubek a jejich případnému kmitání zabráňují tři mezitrubkovnice. Otvory v mezitrubkovnicích jsou rozloženy stejně jako v trubkovnicích, pouze vodorovná osa je posunuta vzhůru, čímž je umožněno rychlejší vytékání chladicí vody z trubek při odstavení kondenzátoru.

Ve spodní části parní strany každého kondenzátoru je umístěn sběrač kondenzátu. Na sběrač jsou sacím potrubím napojena kondenzační čerpadla.

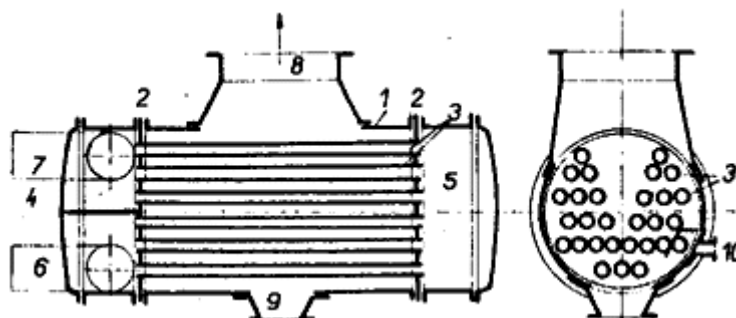
Vlivem kondenzace velkého objemu páry v porovnání s malým objemem kondenzátu vzniká v kondenzátoru poměrně veliký podtlak (vakuum) a to cca 5 kPa (abs.). Vzduch a nezkondenzovatelné plyny jsou z parního prostoru odsávány na bocích kondenzátorů přes podchlazovací svazky prostřednictvím vodoproudých vývěv.

Z parního prostoru každého kondenzátoru je vyvedeno potrubí k západní stěně strojovny, kde je umístěno jištění proti nadměrnému stoupnutí tlaku v parním prostoru. Jištění je provedeno mosaznou membránou, která je za normálního stavu opřena o kruhovou desku s otvory. Při stoupnutí tlaku v kondenzátoru na nebezpečnou mez se membrána prohne a prořízne se o nůž upevněný z její druhé strany. Tím se otevře výfuk do atmosféry.

Do kondenzátoru je přes dvojici ručních ventilů a blánovou trysku zavedená přídavná demi voda. Do sběračů kondenzátu je dále zaveden přes rotametr roztok hydrazinu. Hydrazin se používá k chemickému odplynění kondenzátoru - váže na sebe vzdušný kyslík obsažený v parním prostoru kondenzátoru.

Kondenzátor je uložen na pružinách a pevně spojen s výfukovým hrdlem NT dílu turbíny. Výfuky páry z NT dílu jsou před vstupem do kondenzátoru propojeny. Tepelná dilatace propojovacího potrubí je zajištěna vlnovci na obou krajích. Vstupní a výstupní potrubí chladicí vody je napojeno pomocí gumových kompenzátorů.

Pro kontrolu hladiny kondenzátu je sběrač opatřen dálkovým měřením hladiny. Provozní hladina se pohybuje v rozsahu 30 až 50 cm. Překročení či podkročení provozního rozsahu je signalizováno. [1]

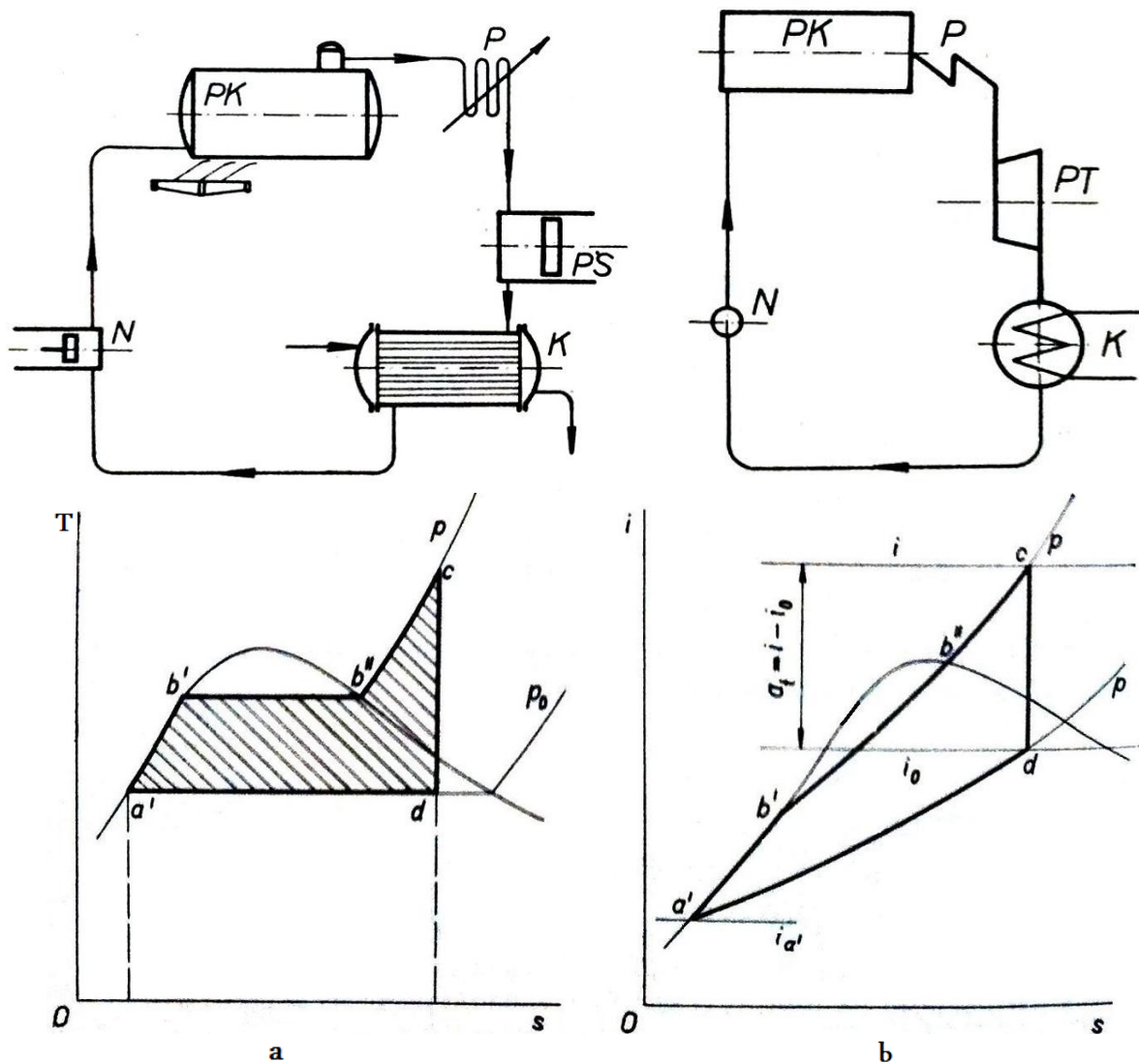


Obrázek 1.2 Dvoutahový povrchový kondenzátor [10]

- 1 - plášť, 2 - trubkovnice, 3 - trubky, 4, 5 - vodní komory, 6 - přívod chladicí vody,
7 - odvod chladicí vody, 8 - přívod páry, 9 - odvod kondenzátu, 10 - odsávání
parovzdušné směsi

1.2. Funkce kondenzátoru v Clausius-Rankinově oběhu

V parním kotli dochází k ohřevu vody (kondenzátu) ze stavu a' na bod varu b' . Kondenzát se odpařuje při $T_s = \text{konst}$ na mez sytosti b'' . Sytá pára proudí z kotle do přehříváku P a odpařuje se na teplotu T (stav c). Přehřátá pára je vedena do parního stroje (PS) či parní turbíny (PT) a adiabatickou expanzí na stav p_0 , T_0 koná práci. Do kondenzátoru (K) proudí mokrá pára a dochází v důsledku odebrání kondenzačního tepla emisní páře chladicím médiem k jejímu zkapalnění ($d-a'$). Kondenzát pokračuje napáječkou N do parního kotle. Viz. obr.1.3 (Zařízení pro parní oběh - Clausius-Rankinův oběh a) v T - s diagramu, b) v i - s diagramu. [2]



Obrázek 1.3 Zařízení pro parní oběh [2]

2. Nároky uvažované při navrhování kondenzátoru

2.1. Požadavky na zařízení

- Co nejmenší rozměry, hmotnost a cena výměníku.
- Co nejmenší tlakové ztráty (čerpací práce).
- Co nejvyšší spolehlivost v provozu.

Všechny výše uvedené požadavky musí být zohledněny při výběru vhodného výměníku tepla. Navzdory své protichůdnosti se mezi nimi musí najít kompromis. Výběr z více druhů řešení posuzovaných dle tohoto pohledu poté představuje optimální navrhovanou variantu.

Maximální provozní spolehlivost je pak zajištěna již v řešení a výrobě výměníku. Značný podíl na ní má kvalita a správně prováděná údržba. Spolehlivost je dána minimální poruchovostí a opravitelností výměníku. [3]

2.2. Požadavky na pracovní (teplonosné) látky

- vysoký součinitel tepelné vodivosti a přestup tepla
- vhodný vztah mezi teplotou varu a tlakem
- nízká viskozita a s ní související nízké tlakové ztráty při proudění
- nízká koroze zařízení
- zdravotní nezávadnost
- relativně nízká cena

Celkově výše uvedené požadavky nejlépe splňují v obvyklých případech voda a vodní pára. Avšak jejich nedostatky jsou především možnost koroze materiálu a vznik nánosů solí obsažených ve vodě na výhřevné ploše. U vody je dále požadavek na udržování dostatečného tlaku, aby při dané pracovní teplotě nedocházelo k varu a nevznikala pára.

2.2.1. Výhody a nevýhody syté páry jako teponosné látky vůči vodě

- Pára protéká výměníkem a tepelnou sítí na úkor své tlakové ztráty a díky tomu není potřeba oběhové čerpadlo jako u vody, díky tomu klesají náklady na investice i provoz čerpadel. Navzdory tomu však dochází k poklesu tlaku páry v důsledku odporů při proudění. To znamená úbytek elektrické energie při teplotárenském provozu, odpovídající snížení entalpického spádu při expanzi o vzniklou tlakovou ztrátu.
- Jelikož je měrná hmotnost páry nižší než u vody, jsou přídavná pevnostní pnutí vyvolána silami zemské tíže, jakož i hydrostatické tlaky jsou u parních výměníků menší než u vody.
- U páry lze zjišťovat netěsnosti a poruchová místa snáze než u vody, oproti tomu však hmotnostní únik páry netěsnostmi je větší. Přitom úprava vody k výrobě páry je značně složitější než u vody a díky tomu i nákladnější. [3]

3. Teoretický výpočet

3.1. Celkové množství tepla výstupní páry z turbíny

Nejdříve je nutno vypočítat příkon kondenzátoru, který se odvádí chladicí vodou. Tento příkon je určen na základě průtoku páry na výstupu z NT dílu turbíny, rozdílu entalpií mokré páry na vstupu a kondenzátu na výstupu z kondenzátoru. Jedná se o naměřené hodnoty a vycházím z předpokladu, že:

- výměník je dokonale těsný
- výměník je vzhledem k okolí dokonale tepelně izolovaný

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \cdot (i_p - i_k) \quad [W] \quad (1)$$

\dot{Q} ... příkon (výkon) kondenzátoru [W]

i_p ... entalpie mokré páry [$J \cdot kg^{-1}$]

i_k ... entalpie kondenzátu [$J \cdot kg^{-1}$]

\dot{m}_p ... hmotnostní průtok páry [$kg \cdot s^{-1}$]

3.2. Určení rychlosti chladicí vody

Rychlost chladicí vody v trubkách kondenzátoru do značné míry ovlivňuje součinitel přestupu a tudíž i prostupu tepla. Čím je w větší, tím menší vyjde chladicí plocha a tím levnější je kondenzátor. Naopak se stoupající rychlostí chladicí vody stoupá odpor na vodní straně kondenzátoru, tím i příkon a cena chladicího čerpadla, jeho pohonu a vlastní spotřeba energie. [4]

3.3. Součinitel přestupu tepla α_1 na straně vody

Nejdříve je nutno stanovit pomocí Reynoldsova čísla o jaký režim proudění se jedná. [5]

$$Re = \frac{w \cdot d_1}{\nu} \quad [-] \quad (2)$$

Laminární proudění :	$Re < 2320$
Přechodová oblast :	$Re = 2320 \div 10000$
Turbulentní proudění :	$Re > 10000$

w ... rychlost chladicí vody [$m \cdot s^{-1}$]

d_1 ... vnitřní průměr trubky [m]

ν ... kinematická viskozita [$m^2 \cdot s^{-1}$]

Výpočet Prandtlova čísla:

Prandtlovo číslo charakterizuje podobnost teplotních a rychlostních polí v proudě. [5]

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot c_p \cdot \rho}{\lambda_{H_2O}} \quad [-] \quad (3)$$

c_p ... měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

ρ ... hustota chladicí vody [$kg \cdot m^{-3}$]

λ_{H_2O} ... tepelná vodivost vody [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

Výpočet Nusseltova čísla:

Nusseltovo číslo charakterizuje poměr mezi přestupem tepla a teplotovým polem v mezní vrstvě. Nusseltovo kritérium (pro turbulentní proudění trubkou): [5]

$$\text{Nu}_{\text{turb}} = 0,021 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,43} \quad [-] \quad (4)$$

Výpočet součinitele přestupu α_1 na straně vody: [4]

Základem výpočtu α_1 je teorie podobnosti, která vychází z předpokladu, že fyzikální děje u modelu a díla jsou si podobné.

$$\alpha_1 = \frac{\text{Nu}_{\text{turb}} \cdot \lambda_{\text{H}_2\text{O}}}{d_1} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (5)$$

$\alpha_1 \dots$ součinitel přestupu tepla na straně vody $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$

3.4. Součinitel přestupu α_2 na straně páry

U kondenzace, při níž se vytváří na chladicí ploše vrstvička kapaliny (filmová kondenzace), je α_2 v mezích $\alpha_2 = 11 \div 16,5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. [4]

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} \right)} \cdot d_2 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (6)$$

$k \dots$ součinitel prostupu tepla $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$

$\alpha_2 \dots$ součinitel přestupu tepla na straně páry $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$

$\lambda \dots$ tepelná vodivost trubky $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$

$d_1 \dots$ vnitřní průměr trubky $[\text{m}]$

$d_2 \dots$ vnější průměr trubky $[\text{m}]$

3.5. Střední (logaritmický) teplotní rozdíl

Výpočet logaritmické teploty (obr. 3.1): teplejší médium vně trubek

Tento výpočet je nutný z důvodu nerovnoměrného rozložení teplot po celé délce kondenzátoru. Na základě uvedeného vztahu (7) byl proveden výpočet středního logaritmického rozdílu teplot. [5]

$$\Delta t_{\text{stř}} = \left[\frac{(t_{p,\text{vst}} - t_{v,\text{výst}}) - (t_{k,\text{výst}} - t_{v,\text{vst}})}{\ln \left(\frac{t_{p,\text{vst}} - t_{v,\text{výst}}}{t_{k,\text{výst}} - t_{v,\text{vst}}} \right)} \right] \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7)$$

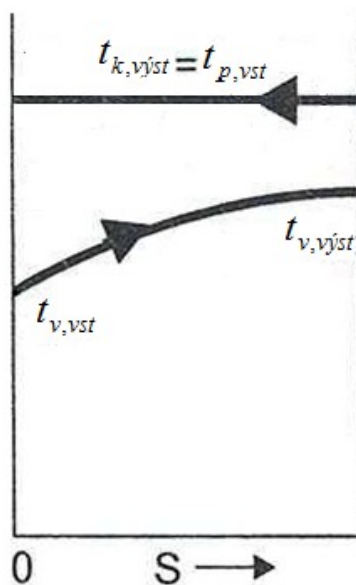
$\Delta t_{\text{stř}}$... střední(logaritmický) teplotní spád [$^{\circ}\text{C}$]

$t_{p,\text{vst}}$... teplota páry na vstupu [$^{\circ}\text{C}$]

$t_{k,\text{výst}}$... teplota kondenzátu na výstupu [$^{\circ}\text{C}$]

$t_{v,\text{vst}}$... teplota vody na vstupu [$^{\circ}\text{C}$]

$t_{v,\text{výst}}$... teplota vody na výstupu [$^{\circ}\text{C}$]



Obrázek 3.1 Teplotní průběh

3.6. Součinitele prostupu tepla - čisté výhřevné plochy

Součinitel prostupu tepla ve výměníku vyjadřuje intenzitu přenosu tepla. Rovnici (6) lze upravit na tvar:

$$k_{\varepsilon} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_2}{\alpha_1 \cdot d_1}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (8)$$

Navzdory tomu, že je možné poměrně přesně určit k na jedné trubce, nelze výpočtem určit přesnou hodnotu k svazku trubek. „*Obsah vzduchu v páře, odpory na parní straně a z toho vyplývající nerovnoměrné proudění páry v tomto prostoru a nestejně teplotní poměry v různých místech kondenzátoru ovlivní místní hodnoty součinitele prostupu tepla do té míry, že kolísá v mezích 45-100%, takže průměrná hodnota k je vždy nižší než teoretická.*“ [4] Z těchto důvodů se pro dimenzování kondenzátoru používá empirických hodnot k vyplývajících z měření na skutečných kondenzátorech. Podle Heat Exchange Institute: Standards for Steam Surface Condensers NY 1162 se stanoví součinitel prostupu tepla pomocí diagramů 6.1, 6.2 a tabulky 6.4. [4]

$$k_{sk} = k_o \cdot c_t \cdot c_m \cdot \varphi \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (9)$$

k_{sk} ... součinitel prostupu tepla – skutečný $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$

k_o ... základní součinitel prostupu tepla v kondenzátoru $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$

c_t ... korekční součinitel pro vstupní teplotu chladicí vody $[-]$

c_m ... korekční faktor pro daný materiál a tloušťku stěny $[-]$

φ ... součinitel zanášení $[-]$

3.7. Součinitele prostupu tepla - zanesené výhřevné plochy

Zanášení lze definovat jako usazování různých materiálů – produktů koroze, solí či pevných látek na výhřevnou plochu výměníku, které jsou obsaženy v teplotonosné látce. Nánosy mohou vznikat na obou stranách pracovních látek. [4]

Součinitel prostupu tepla u zanesených trubek je nižší vlivem zanesení trubek na straně chladící vody. S tímto faktorem je počítáno v závěrečném naddimenzování kondenzátoru.

Zanášení lze ovlivnit:

- úpravou vody, tj. snížení koncentrace soli,
- mechanickým čištěním trubek doporučenými chemikáliemi.

3.8. Velikost teplosměnné plochy

Pro odvod přivedeného množství tepla z turbíny je třeba navrhnout adekvátní velikost teplosměnné plochy vyplývající z rovnice (10):

$$\dot{Q} = S \cdot k_{\epsilon} \cdot \Delta t_{stř} \quad [W] \quad (10)$$

$$S = \frac{\dot{Q}}{k_{\epsilon} \cdot \Delta t_{stř}} \quad [m^2] \quad (11)$$

\dot{Q} ... příkon(výkon) kondenzátoru [W]

S ... velikost teplosměnné plochy [m²]

k_{ϵ} ... součinitel prostupu tepla – čistý stav trubek [W · m⁻² · K⁻¹]

$\Delta t_{stř}$... střední (logaritmický) teplotní spád [°C]

3.9. Celkový počet trubek

Na základě vypočtené potřebné velikosti teplosměnné plochy a stanovenému prostorovému omezení se vypočte množství trubek.

$$n_{tr} = \frac{S}{\pi \cdot d_2 \cdot l} \quad [-] \quad (12)$$

n_{tr} ... počet trubek v kondenzátoru [-]

d_2 ... vnější průměr trubky [m]

l ... délka trubky [m]

4. Uspořádání trubek v trubkovnici

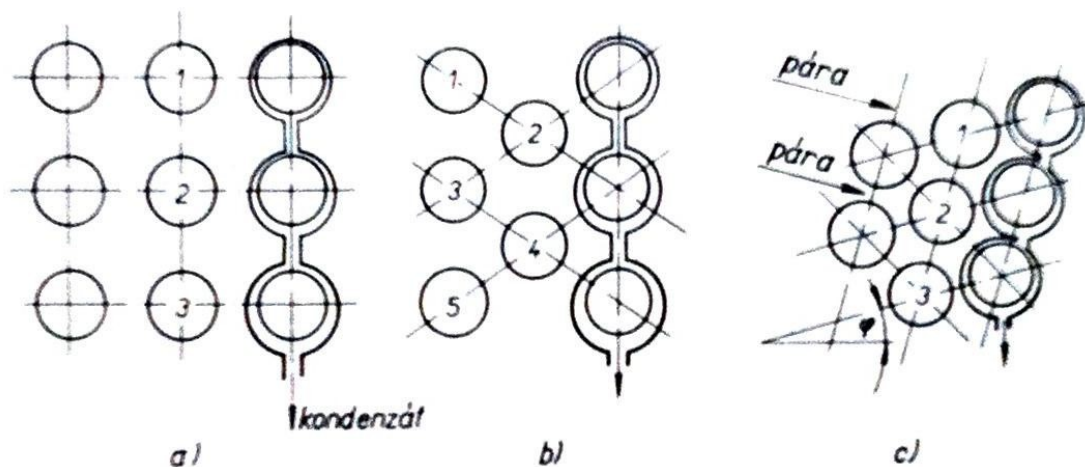
4.1. Podmínky uspořádání

Během návrhu uspořádání trubek je třeba dodržet následující uspořádání:

- 1) je nutno zajistit páře volný přístup k co největšímu počtu trubek a ke kondenzátu ve sběrači na nejnižším místě kondenzátoru,
- 2) odpor parní strany kondenzátoru má být co nejmenší, rychlost páry v mezerách mezi svazky trubek 50 až 60 m/s,
- 3) stékající kondenzát by měl omývat co nejméně trubek,
- 4) nesmějí nikde vznikat mrtvé parní prostory, kde by docházelo ke stagnaci páry. [4]

4.2. Varianty uložení

Při konstrukci kondenzátoru se nejčastěji používají varianty uložení trubek uvedené na obr. 4.1.



Obrázek 4.1 Varianty uložení [2]

- a) uložení za sebou – Výhody tohoto uložení jsou v malém odporu při průchodu páry, což je kompenzováno zhoršeným přestupem tepla. To je také zapříčiněno stékajícím kondenzátem z výš položených trubek. Obr. 4.1-a
- b) střídané uložení – Má větší hodnotu odporu při průchodu páry než uložení za sebou avšak vykazuje lepší hodnoty přestupu tepla. Dráha páry není přímá

a vyskytuje se zde stejný problém se stékajícím kondenzátem z výš položených trubek. Obr. 4.1-b

- c) Ginabat – Jedná se o uložení vycházející ze střídavého uložení, které je však pootočeno o úhel φ , který se pohybuje v rozmezí $\varphi = 10 - 15^\circ$. Problém stékajícího kondenzátu je částečně vyřešen střídavým uložení, kde dochází ke stékání kondenzátu na níže položenou trubku, ale smáčená plocha se zmenší. Obr. 4.1-c

Pro přenos tepla konvekcí je nejvýhodnější protiproud, proudění vnější pracovní látky kolmo výhřevnou plochou trubek se střídavým uspořádáním. Výměník tohoto provedení vyniká menší výhřevnou plochou a tudíž i hmotností. [3] Toto uspořádání bylo zvoleno pro řešený kondenzátor.

5. Výpočet celkového množství tepla odvedeného v kondenzátoru

Kondenzátor je navrhován pro umístění za turbínou (obr.5.1), jejíž základní parametry jsou uvedeny v následující kapitole.



Obrázek 5.1 Parní turbína

5.1. Parametry turbíny

typ	K - 56 -9
rok výroby	TG 4 1996
počet a uspořádání těles	1xVT, 1xNT
počet neregulovaných odběrů páry	5

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
jmenovitý výkon	56	MW
maximální výkon	60	MW
jmenovité otáčky	3000	ot·min ⁻¹
jmenovitý tlak admisní páry před RZV	8,826	MPa
jmenovitá teplota admisní páry	525	°C
hltnost	230	t·h ⁻¹

5.2. Výpočet tepelného výkonu kondenzátoru

Výpočet je proveden pro maximální výkon 60 MWe.

Energie v páře, která vstupuje do kondenzátoru:

teplota = 29,45°C	tlak = 0,0041 [MPa abs.]
hmotnostní průtok páry = 40,9135 [kg·s ⁻¹]	$i_p = 2520$ [kJ·kg ⁻¹]

Výstup kondenzátu ze sběrače:

teplota = 29,45°C	tlak = 0,0041 [MPa abs.]
	$i_k = 123,4$ [kJ·kg ⁻¹]

Teplo odvedené v kondenzátoru dle (1):

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \cdot (i_p - i_k) = 40,9135 \cdot (2520 - 123,4) = 98053,294 \text{ [kW]} \Rightarrow 98,05 \text{ [MW]}$$

6. Návrh uspořádání trubek a velikosti teplosměnné plochy

6.1. Hodnoty potřebné pro výpočet velikosti teplosměnné plochy

Kondenzátorové (chladicí) trubky mají obvykle vnější průměr 18-30 mm. Tloušťka stěny se pohybuje 1-1,5 mm. Rychlost proudění chladicí vody se doporučuje větší než $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ z důvodu nižšího zanášení.

Navržené parametry:

průměr trubek	$\varnothing 20 \times 1 \text{ mm}$
materiál trubek	mosaz (CuZn 28 Sn)
rychlost proudění chladicí vody	$2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Níže uvedené hodnoty jsou převzaty z garančního měření výrobce TG:

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
jmenovitá teplota chladicí vody - vstup	15	$^{\circ}\text{C}$
emisní pára do kondenzátoru	40,9135	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
teplota emisní páry	29,45	$^{\circ}\text{C}$
výstupní teplota chladicí vody z K	25,2	$^{\circ}\text{C}$
množství chladicí vody do K	2305,6	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

6.1.1. Výpočet součinitele přestupu tepla α_1 na straně vody

Pomocné hodnoty o vodě (tab.6.1):

Fyzikální veličina	Hodnota	Jednotka
ν	$1,0034 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
C_p	$4,183 \cdot 10^3$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ρ	998,2	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$	$59,9 \cdot 10^{-2}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Tabulka 6.1 Pomocné hodnoty

Výpočet Reynoldsova čísla dle rovnice (2) :

$$Re = \frac{w \cdot d_1}{\nu} = \frac{2,0,018}{1,0034 \cdot 10^{-6}} = 35878,015 \text{ [-]} \Rightarrow \text{turbulentní proudění}$$

Výpočet Prandtlova čísla dle rovnice (3):

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot c_p \cdot \rho}{\lambda_{H_2O}} = \frac{1,0034 \cdot 10^{-6} \cdot 4,183 \cdot 10^3 \cdot 999,1}{59,9 \cdot 10^{-2}} = 7,001 \text{ [-]}$$

Výpočet Nusseltova čísla dle rovnice (4):

$$Nu_{turb} = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} = 0,021 \cdot 35878,015^{0,8} \cdot 7,001^{0,43} = 213,551 \text{ [-]}$$

Výpočet součinitele přestupu α_1 na straně vody:

Výpočet dle rovnice (5):

$$\text{Pro: } Re = 36186,567 \text{ [-]} \quad Pr = 7,001 \text{ [-]}$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu_{turb} \cdot \lambda_{H_2O}}{d_1} = \frac{213,551 \cdot 59,9 \cdot 10^{-2}}{0,018} = 7106,49 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

6.1.2. Výpočet součinitele přestupu α_2 na straně páry

Výpočet součinitele přestupu tepla páry na vnějším povrchu trubek vychází ze vzorce:

$$Nu = C \cdot (Ga \cdot Pr \cdot K)^n \text{ [-]} \quad (13)$$

C ... konstanta závisující na uspořádání trubek [-]

Ga ... Galileiho číslo [-]

K ... Kondenzační kritérium [-]

n ... experimentálně zjištěná konstanta [-]

Nusseltova teorie dobře souhlasí s experimenty, zavede-li se oprava na volný pohyb kondenzátu. Rovnice (13) slouží pro výpočet přestupu tepla při kondenzaci čisté páry.[8]

Pro praktické použití lze tento vzorec upravit do tvaru:

$$\alpha_2 = C \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\mu}} \cdot \frac{\sqrt[4]{r}}{\sqrt[4]{l \cdot (t_p - t_w)}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (14)$$

t_p ... teplota páry [$^{\circ}\text{C}$]

t_w ... teplota vnějšího povrchu trubky [$^{\circ}\text{C}$]

l ... u vodorovných trubek vnější průměr [m]

r ... výparné teplo $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]^{\frac{1}{4}}$

μ ... dynamická viskozita $[\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}]$

„Nyní lze poměrně snadno dopočíst jednotlivě celé výrazy. Přičemž hodnota

odmocniny $\sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\mu}} = b$ odpovídá střední teplotě vrstvy kondenzátu $t_m = 0,5 \cdot (t_p + t_w)$

a $\sqrt[4]{r}$ odpovídá teplotě syté páry t_p .“ [8]

Předběžný výpočet součinitele přestupu tepla na straně páry:

Odhadnutá hodnota: $t_w = 28$ [$^{\circ}\text{C}$].

Střední teplota vrstvy kondenzátu:

$$t_m = 0,5 \cdot (t_p + t_w) = 0,5 \cdot (29,45 + 28) = 28,725 \quad [\text{^{\circ}C}] \quad (15)$$

t_m ... střední teplota vrstvy kondenzátu [$^{\circ}\text{C}$]

Dle výsledku rovnice (15) je z tab. 6.2 odečtena hodnota výrazu $\sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\mu}} = b$

(pro 30°C). Teplota syté páry odpovídá teplotě 29,45°C, a proto je $\sqrt[4]{r}$ odečtena z tab. 6.2 též pro teplotu 30°C. Hodnota C pro vodorovné trubky je rovna 0,72. Výpočet dle rovnice (14):

$$\alpha_2 = C \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\mu}} \cdot \frac{\sqrt[4]{r}}{\sqrt[4]{d_2 \cdot (t_p - t_w)}} = 0,72 \cdot 1360,74 \cdot \frac{7,011}{\sqrt[4]{0,02 \cdot (29,45 - 28,725)}} = 19794,549 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Pomocné hodnoty pro výpočet součinitele přestupu tepla při kondenzaci vodní páry:

t [°C]	p [kPa]	$\sqrt[4]{r}$ [J · kg ⁻¹] ^{1/4}	$\sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\mu}}$ [J ³ · kg · m ⁻⁸ · s ⁻² · K ⁻³] ^{1/4}
0	0,6108	7,05	983,73
20	2,337	7,02	1203,24
30	4,421	7,011	1360,74
40	7,375	7,007	1390,23
60	19,917	6,978	1552,83
80	47,36	6,935	1682,91
100	101,31	6,892	1788,6

Tabulka 6.2 Pomocné hodnoty [8]

Upřesněný výpočet součinitele přestupu tepla na straně páry:

Hodnoty potřebné pro výpočet α_2 :

Průměrná teplota chladicí vody:

$$t_1 = \frac{t_{v,výst} + t_{v,vstup}}{2} = \frac{25,2 + 15}{2} = 20,1 \text{ [°C]} \quad (16)$$

t_1 ... průměrná teplota chladicí vody [°C]

Teplu sdělené 1 metrem válcové stěny:

$$q_l = \frac{\pi \cdot (t_p - t_1)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\text{mosaz}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \quad (17)$$

$$q_l = \frac{\pi \cdot (29,45 - 20,1)}{\frac{1}{7106,49 \cdot 0,018} + \frac{1}{2 \cdot 108,7 \cdot \ln \frac{0,02}{0,018}} + \frac{1}{19794,549 \cdot 0,02}} = 2712,730 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1}]$$

q_l ... teplo sdělené 1 metrem trubky [$^{\circ}\text{C}$]

Upřesnění dříve odhadnuté teploty vnějšího povrchu trubky:

$$t_w = t_p - \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} \quad (18)$$

$$t_w = 29,45 - \frac{2712,730}{\pi} \cdot \frac{1}{19794,549 \cdot 0,02} = 27,269 \text{ [}^{\circ}\text{C}]$$

Střední teplota vrstvy kondenzátu dle rovnice (15):

$$t_m = 0,5 \cdot (t_p + t_w) = 0,5 \cdot (29,45 + 27,269) = 28,360 \text{ [}^{\circ}\text{C}]$$

Výpočet dle rovnice (14): po zpřesnění teploty vnějšího povrchu trubky na straně páry.

$$\alpha_2 = C \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3}{\mu}} \cdot \frac{\sqrt[4]{r}}{\sqrt[4]{d_2 \cdot (t_p - t_w)}} = 0,72 \cdot 1360,74 \cdot \frac{7,011}{\sqrt[4]{0,02 \cdot (29,45 - 27,269)}} =$$

$$= 15030,250 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Jelikož se v navrhovaném kondenzátoru nachází více vodorovných trubek nad sebou, stéká kondenzát z hořejších trubek na spodní, u nichž je vrstva kondenzátu větší a součinitel přestupu tepla menší než u hořejších trubek. Hodnota korekčního součinitele poté závisí na uspořádání řad a na pořadí řady trubek směrem shora. Dle diagramu lze určit hodnoty korekčního součinitele pro střídavé uspořádání. [8]

Hodnota α_2 dle řady vychází ze vzorce:

$$\alpha_{2,\text{řad}} = \varepsilon \cdot \alpha_2 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (19)$$

$\alpha_{2,\text{řad}}$... přestup tepla na straně páry odpovídající řady $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$

ε ... korekční součinitel [-]

Řada	Korekční součinitel ε	$\alpha_{2,\text{řad}}$
1.	1,00	15030,250
15.	0,59	8867,848
30.	0,55	8266,638
45.	0,50	7515,125

Tabulka 6.3 Závislost součinitele přestupu tepla na řadě trubek [8]

Střední hodnota součinitele přestupu tepla na straně páry (dle tab.6.3):

$$\alpha_{2,\text{stř}} = \frac{\sum \alpha_{2,\text{řad}}}{n} \quad (20)$$

$$\alpha_{2,\text{stř}} = \frac{15030,250 + 8867,848 + 8266,638 + 7515,123}{4} = 9919,965 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$\alpha_{2,\text{stř}}$... střední hodnota součinitele přestupu tepla na straně páry

n...počet sekcí, na které byl kondenzátor pomyslně rozdělen pro přesnější výpočet

6.1.3. Výpočet středního (logaritmického) teplotního rozdílu

Výpočet logaritmické teploty – protiproud dle rovnice (7):

$$\Delta t_{\text{stř}} = \left[\frac{(t_{p,\text{vst}} - t_{v,\text{výst}}) - (t_{k,\text{výst}} - t_{v,\text{vst}})}{\ln \left(\frac{t_{p,\text{vst}} - t_{v,\text{výst}}}{t_{k,\text{výst}} - t_{v,\text{vst}}} \right)} \right] = \left[\frac{(29,45 - 25,2) - (29,45 - 15)}{\ln \left(\frac{29,45 - 25,2}{29,45 - 15} \right)} \right] = 8,335 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

6.1.4. Výpočet součinitele prostupu tepla-čisté výhřevné plochy

Pro názornost je výpočet součinitele prostupu tepla proveden dvěma způsoby. Při první výpočtu dle rovnice (8) zanedbávám vliv zanesení výhřevných ploch, který je zohledněn až v závěrečném naddimenzování kondenzátoru. Tato rovnice obsahuje výše vypočtenou střední hodnotu součinitele přestupu tepla na straně páry. Dále je počítáno s výsledkem této rovnice. Ve druhé variantě dle rovnice (9) vyplývá hodnota k z měření na skutečných kondenzátorech.

Výpočet dle rovnice (8):

$$k_{\epsilon} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{2,\text{stf}}} + \frac{d_2}{2 \cdot \lambda_{\text{mosaz}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} + \frac{d_2}{\alpha_1 \cdot d_1}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{9919,965} + \frac{0,02}{2 \cdot 108,7} \cdot \ln \frac{0,02}{0,018} + \frac{0,02}{7106,49 \cdot 0,018}} = 3747,407 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

Podle Heat Exchange Institute: Standards for Steam Surface Condensere NY 1162 se stanoví součinitel prostupu tepla pomocí diagramu 6.1, korekční součinitel c_t dle diagramu 6.2 a z tabulky 6.4 korekční součinitel c_m pro různé materiály a tloušťky stěny. [4]

Výpočet dle rovnice (9):

$$k_{sk} = k_o \cdot c_t \cdot c_m \cdot \varphi$$

$$k_{sk} = 3875 \cdot 0,9 \cdot 1,02 \cdot 0,85$$

$$k_{sk} = 3023,663 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

Tloušťka stěny trubky	0,56	0,71	0,89	1,00	1,25	1,50	1,65	2,11	2,77
CuZn 28 Sn									
Měď s arzenem	1,06	1,04	1,02	1,02	1,00	0,98	0,96	0,92	0,87
Hliník									

Tabulka 6.4 Korekční součinitel c_m [4]

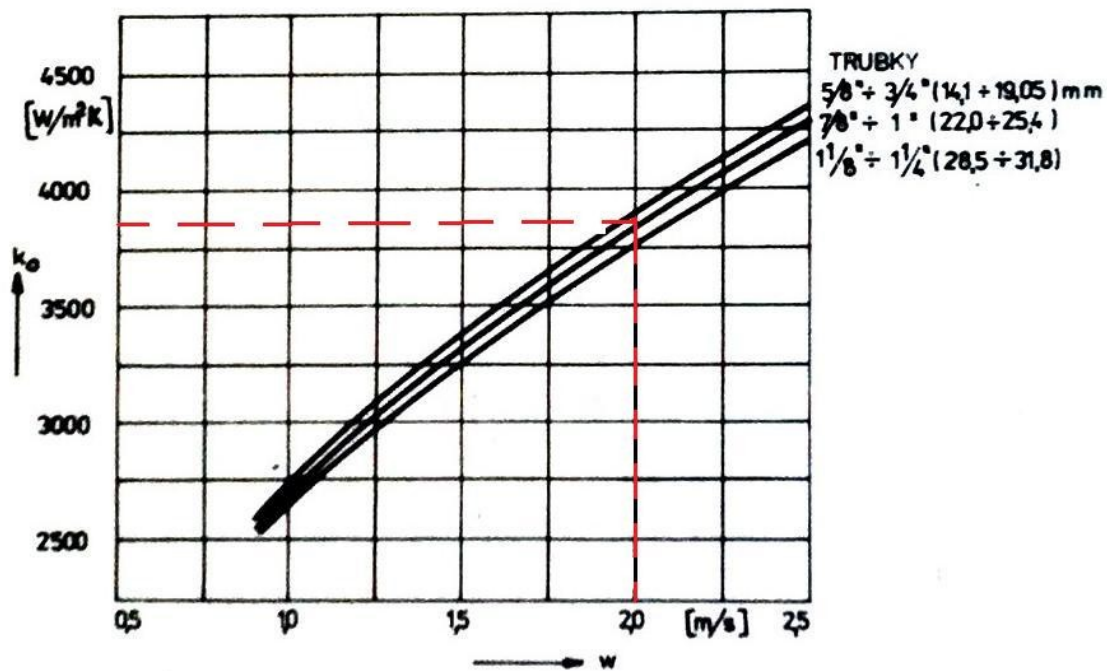


Diagram 6.1 Součinitel prostupu tepla k_o [4]

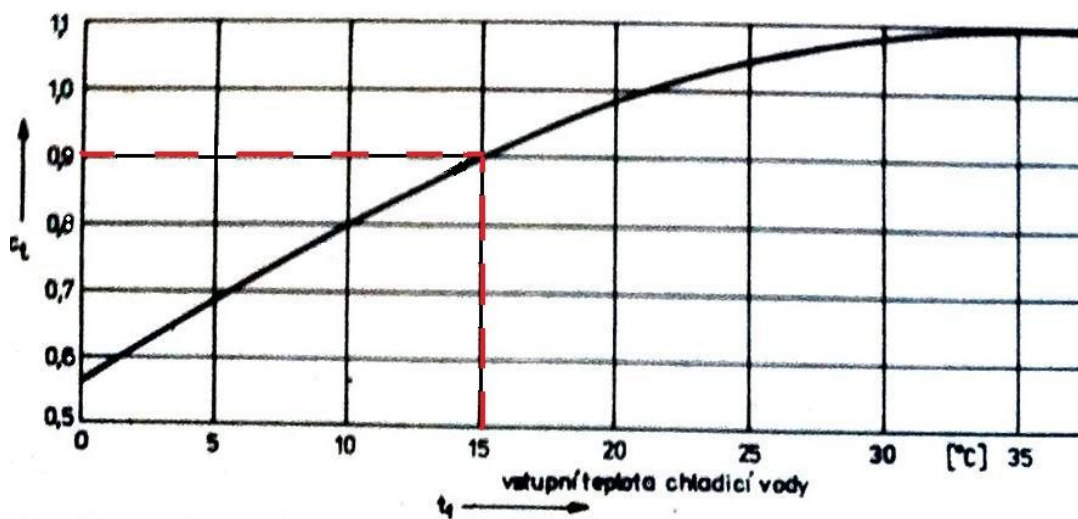


Diagram 6.2. Korekční součinitel c_t [4]

6.2. Výpočet velikosti teplosměnné plochy

- za stavu čistých trubek dle rovnice (11):

$$S = \frac{\dot{Q}}{k_{\zeta} \cdot \Delta t_{\text{stř}}} = \frac{98053294}{3747,407 \cdot 8,335} = 3139,249 \text{ [m}^2\text{]}$$

6.3. Celkový počet trubek

Z dispozičního uspořádání turbíny a navazujících zařízení vyplývají prostorová omezení pro návrh kondenzátoru. Z těchto důvodů byla zvolena délka trubky v kondenzátoru 6100 mm. Výpočet dle rovnice (12):

$$n_{tr} = \frac{S}{\pi \cdot d_2 \cdot l} = \frac{3139,249}{\pi \cdot 0,02 \cdot 6,1} = 8190,606 \quad [-]$$

S ohledem na vliv zanášení teplosměnných ploch na straně chladicí vody je nutno při realizaci kondenzátoru navýšit velikost teplosměnné plochy přibližně o 10% oproti teoretickým výpočtům. Do této rezervy je zahrnuta i problematika poškození některých z trubek. Případná výměna samostatné trubky je technicky velice náročná, a proto se spíše přistupuje k jejímu zaslepení. Počet trubek v navrženém kondenzátoru s ohledem na výše zmíněné okolnosti byl stanoven na 9000 ks.

Z provozních důvodů např. čištění a oprav je kondenzace řešena ve dvou samostatných zařízeních rozdělených na poloviny.

6.4. Parametry navrženého kondenzátoru

Na následujícím obrázku (obr 6.1) je zobrazena realizace obdobného kondenzátoru.



Parametry navrženého kondenzátoru:

ø kondenzátoru – 2880 mm

ø trubky vnitřní/vnější - 18/20 mm

délka trubky – 6100 mm

počet trubek v K – 9000 ks

Obrázek 6.1 Kondenzátor

7. Posud'te vliv netěsnosti kondenzátoru

Na zhoršení vakua v kondenzátoru se můžou podílet netěsnosti trubek i netěsnosti armatur na potrubích napojených na parní stranu kondenzátoru (doplňování demineralizované vody, odběr vzorků).

7.1. Netěsnosti trubek

7.1.1. Smísení demineralizované a chladicí vody

Vzájemné oddělení kondenzující páry od chladicího média a okolí musí být co nejdokonalejší tak, aby zaručilo, že chladicí voda nevnikne do parního prostoru.

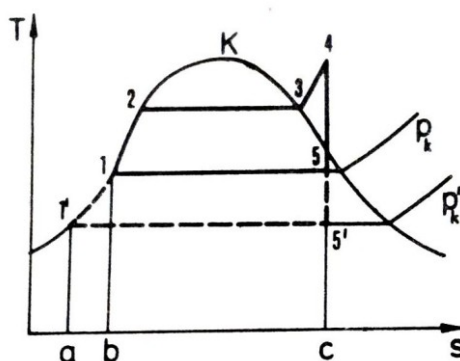
Kontaminace demineralizované vody procházející celým cyklem chladicí vodou je velmi zásadní problém. Může být narušena funkčnost navazujících zařízení vlivem zanesení minerály a dalších nečistot obsažených v chladicí vodě.

7.1.2. Zhoršení vakua

Vlivem netěsnosti v kondenzátoru dochází ke zhoršení vakua. Požadavek na kondenzátor je, že musí dosáhnout co nejdokonalejšího vakua. Tohoto cíle lze dosáhnout vhodnou konstrukcí, těsností trubek, dokonalým odvodu vzduchu a čistotou ploch pro přestup tepla. Pokles vakua v kondenzátoru negativně ovlivňuje účinnost turbíny a tím i celého cyklu.

7.1.3. Zlepšení vakua v kondenzátoru

Zmenšení množství odvedeného tepla je možné snížením tlaku, při kterém je teplo z oběhu odváděno. Při tom se plocha pod čarou $T=\text{konst}$ (1-5-b-c-1), která odpovídá v diagramu T-s odvedenému teplu, zmenší o plochu 1'-1-5-5'-1' a zvětší o plochu a-1'-1-b-a, která je podstatně menší. [6] Viz. obr.7.1.

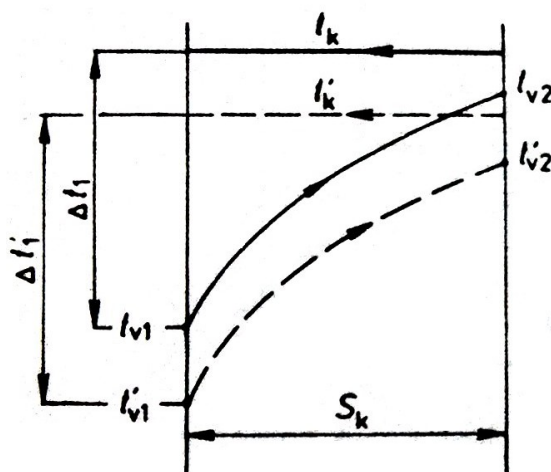


Obrázek 7.1 Vliv protitlaku (tlaku v kondenzátoru) na tepelnou účinnost [6]

U kondenzační turbíny lze dosáhnout zlepšení vakua těmito způsoby:

- a) snížením teploty chladicí vody
- b) zvětšením průtoku chladicí vody
- c) zvětšením teplosměnné plochy kondenzátoru.

Jedním, z nejvhodnějších způsobů zlepšení vakua v kondenzátoru je použití studenější chladicí vody, avšak záleží na tom, zda to přírodní podmínky dovolí. Viz. obr.7.2.



Obrázek 7.2 Snížení teploty chladicí vody [9]

Δt_1 ... rozdíl teplot chladicí vody na vstupu a vystupujícího kondenzátu [°C]

$\Delta t'_1$... rozdíl snížené teploty chladicí vody na vstupu a snížené teploty vystupujícího kondenzátu [°C]

t_k ... teplota kondenzátu [°C]

t'_k ... teplota kondenzátu po použití chladnější chladicí vody [°C]

t_{v1} ... teplota chladicí vody vstupující do K [°C]

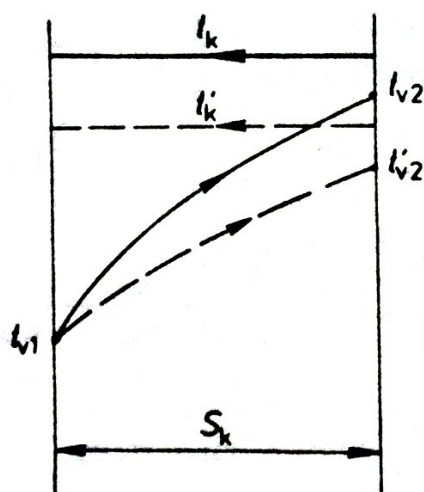
t'_{v1} ... snížená teplota chladicí vody vstupující do K [°C]

t_{v2} ... teploty chladicí vody vystupující z K [°C]

t'_{v2} ... snížená teplota chladicí vody vystupující z K [°C]

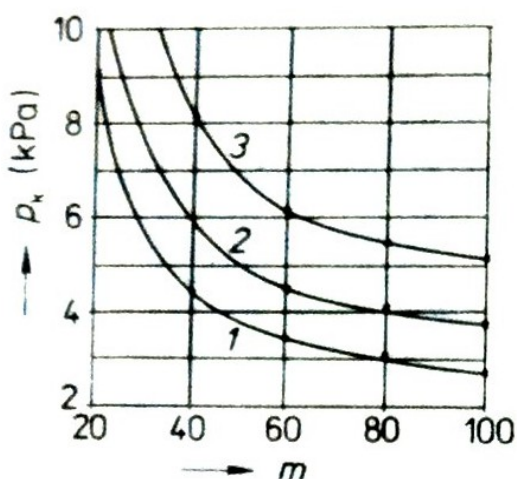
s_k ... velikost teplosměnné plochy kondenzátoru [°C]

Další možností je zvýšení průtoku chladicí vody. To však vyžaduje zvýšení vlastní spotřeby energie na pohon čerpadla, popřípadě současné zvýšení pořizovacích nákladů. Vliv zvýšení průtoku chladicí vody je znázorněn na obr.7.3.



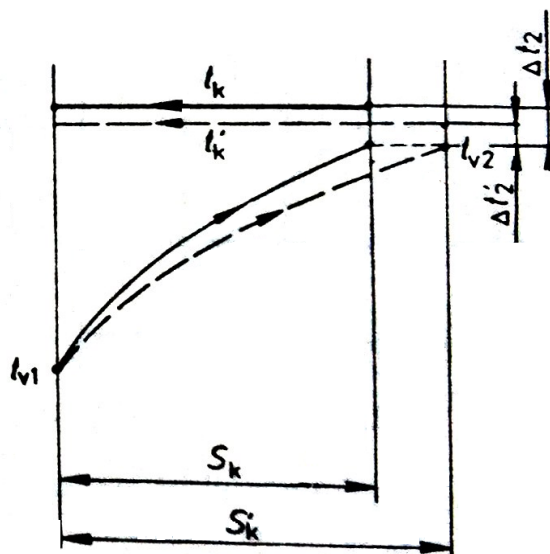
Obrázek 7.3 Zvětšení průtoku chladicí vody [9]

Na obr.7.4 je znázorněna závislost tlaku p_k na teplotě vody a poměrném množství vody. Teplota chladicí vody t_{v1} závisí na klimatických podmínkách. Tlak v kondenzátoru blízký $p_{k,m}$ (tlak v kondenzátoru při maximálním výkonu) bývá dosažen jen při značně nízké teplotě vody t_{v1} , při velkém množství chladicí vody \underline{m} a malém koncovém teplotním spádu Δt_2 . Dosažený tlak vysokého vakua však není obvykle z širšího pohledu žádoucí a skutečný tlak v kondenzátoru se volí vyšší. [9]



Obrázek 7.4 Závislost p_k na množství chladicí vody \underline{m} a teplotě t_{v1} pro $\Delta t_2=3^\circ\text{C}$ 1- $t_{v1}=15^\circ\text{C}$;
2 - $t_{v1}=20^\circ\text{C}$; 3- $t_{v1}=25^\circ\text{C}$ [9]

Rovněž je možné zvětšit teplosměnnou plochu kondenzátoru. To ovšem opět vyžaduje zvýšení investičních nákladů. Vliv zvětšení plochy kondenzátoru je uvedeno na obr.7.5.



Obrázek 7.5 Zvětšení teplosměnné plochy kondenzátoru [9]

Δt_2 ... rozdíl teplot chladicí vody na výstupu a vystupujícího kondenzátu [$^{\circ}\text{C}$]

$\Delta t'_2$... rozdíl snížené teploty chladicí vody na výstupu a snížené teploty vystupujícího kondenzátu [$^{\circ}\text{C}$]

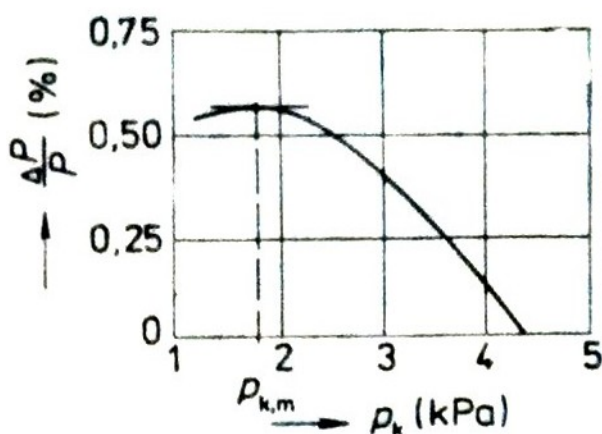
s'_k ... zvětšená teplosměnná plocha [m^2]

Při zvyšování vakua v kondenzátoru velmi rychle roste měrný objem páry na výstupu z turbíny. Tento zvětšený objem páry poté musí protéci posledními stupni turbíny a vyžaduje tedy zvětšení délky lopatek v posledních stupních. U větších turbín není možno zpracovat velké objemy páry v jednom proudu a je tedy nutno provést víceproude uspořádání parní turbíny. To se však nepříznivě projeví na pořizovacích nákladech. [9]

Úměrně se zmenšováním protitlaku se zvyšuje vlhkost páry na vstupu do kondenzátoru. Vlhkost páry má nepříznivý vliv na termodynamickou účinnost parní turbíny a snižuje životnost posledních stupňů. [6]

Během změny tlaku v kondenzátoru dochází ke změně termodynamické účinnosti posledního stupně, a proto se mění i výkon celé turbíny. Na obr.7.6 je znázorněna závislost změny výkonu turbíny na tlaku v kondenzátoru p_k .

Při zlepšení vakua nejprve dochází ke zvyšování výkonu, avšak později dosahuje svého maxima a dále se zmenšuje. Tento průběh změny výkonu je způsoben tím, že od určité hodnoty protitlaku dochází k dodatečné expanzi za lopatkovými řadami posledního stupně a k odklonu proudu na výstupu z lopatkové mříže. Změna spádu, který připadá na dodatečnou expanzi, nemůže být využita ke konání práce v turbíně. Při snižování tlaku v kondenzátoru klesá i teplota kondenzátu a následně je třeba pro jeho ohřátí v prvním regeneračním ohříváku většího množství páry z odběru turbíny. Proto se průtok páry posledními stupni i výkon turbíny zmenší. [9]



Obrázek 7.6 Závislost změny výkonu turbíny na změně tlaku na výstupu [9]

Z výše uvedených možností zlepšování vakua v kondenzátoru je zřejmé, že existuje určitá technicko-ekonomická hranice a není možno volit velikost vakua pouze z hlediska termické účinnosti.

8. Závěr

Po provedení celkového výpočtu, zvážení různých alternativ a s ohledem na provozní a prostorové podmínky v EOP byl navržen kondenzátor s následujícími parametry.

V navrženém kondenzátoru dochází ke kondenzaci páry za pomoci chladicí vody, která je vedena trubkami o průměru 20 x 1 mm. Optimálním materiálem trubek je mosaz, která je vhodná svými fyzikálními vlastnostmi a v neposlední řadě i pořizovací cenou. Na základě prostorových požadavků v EOP je délka trubek navržena 6,1m. Pro odvod požadovaného množství tepelné energie páry byl zvolen na základě vypočtené teplosměnné plochy a zvážení možných negativních vlivů jako např. poškození trubky či zanesení teplosměnné plochy, počet trubek 9000 ks. Jejich uspořádání je kosočtverečné jelikož se jedná o řešení s pozitivním efektem na rozměry výhřevné plochy a tudíž i na hmotnost celého zařízení.

Součástí zadání bakalářské práce byla i problematika vlivů netěsností kondenzátoru. Jedním z negativních vlivů zapříčiněných netěsnostmi trubek v kondenzátoru je smísení demineralizované vody s chladicí vodou. Hrozí zde nebezpečí narušení funkčnosti navazujících zařízení způsobené minerály a dalšími nečistotami obsaženými v chladicí vodě. Dále dochází ke zhoršení vakua způsobující pokles účinnosti turbíny a tím i celého cyklu.

9. Použitá literatura

- [1] MELNYK, Pavel. *Provozní předpis - strojovna : TG 1,2,4* . Opatovice nad Labem : EOP, 2004. 55 s.
- [2] KALČÍK, Josef; SÝKORA, Karel. *Technická termomechanika*. Praha : Academia, 1973. 536 s.
- [3] OCHRANA, Ladislav. *Kotle a výměníky tepla*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2004. 85 s.
- [4] AMBROŽ, Jaroslav. *Parní turbíny a kondenzace*. Praha : ČVUT, 1984. 281 s.
- [5] IBLER, Zdeněk, et al. *Technický průvodce energetika*. Praha : Vydavatelství BEN – technická literatura, 2002. 384 s.
- [6] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Strojní zařízení elektráren*. Praha : SNTL, 1975. 332 s.
- [7] KADRNOŽKA, Jaroslav ; OCHRANA, Ladislav. *Teplárenství*. Brno : CERM, 2001. 178 s.
- [8] CIKHART, Jiří. *Základy metodiky výpočtu výměníků tepla*. Praha : ČVTS, 1975. 60 s.
- [9] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné elektrárny a teplárny*. Praha : SNTL, 1984. 607s.
- [10] HUČKO, Branislav. *Elektrárne I* [online]. Bratislava : STU-Bratislava, 2001 [cit. 2011-04-12]. Konštrukcia povrchových kondenzátorov, Dostupné z WWW: <http://aladin.elf.stuba.sk/Katedry/KMECH/slovakversion/Predmety/ELEKTRARNE_I/index.html>.